論 文

論文 72-9-1-3

線型回路에 있어서의 缺陷識別 매트릭스

(Fault Identification Matrix in Linear Networks)

林 光 鎬*

(Yim, Kwang Ho)

요 약

단순한 외부 측정만으로써 수동 및 능동 회로망에서의 한개의 결함요소(Faulty Element)를 결정하기위해서 벡터를 이용한 한 방법을 연구했다.

큰 회로망은 몇개의 작은 회로망이 연결되었다고 생각할 수 있다.[2] 여러 주파수에서의 전달 함수의 크기와 회로요소의 변화와의 사이에서 일어나는 관계를 이용함으로써 Fault Simulation Curve를 그릴 수 있다. 이곡선으로부터 결함식별영역(Fault Identification Region)을 정의한다.

정의된 결함식별영역에 따라 결함식별 매트릭스(Fault Identification Matrix)가 형성된다.

어떤 회로로부터 측정된 치를 성분으로하는 벡터를 결함식별 매트릭스에 곱해줌으로써 다른 한개의 벡터를 유도하는데 이유도된 벡터의 성분이 회로의 결함요소를 식별해주는 것이다.

결함식별방법을 위한 한 시험절차가 제시되고 실험에 의하여 입증되었다.

ABSTRACT

A method utilizing vector representation is investigated for determining a faulty element in passive and active networks by simple external measurements.

A large system may be considered as an interconnection of a number of subnetworks. By utilizing the relationships between the magintudes of a transfer function at various frequencies and the deviations of a circuit element, the fault simulation curves can be drawn. The fault identification regions are defined from the fault simulation curves. A fault identification matrix is constructed corresponding the defined fault identification regions.

The fault identification matrix, when premultiplied by a vector whose components are measured from a network, yields another vector whose components identify a network element which is faulty.

A test procedure for the fault identification method is presented and verified by experiments.

1. 서 론

전자분야에 있어서의 최근 발전은 전자장치의 복잡성을 계속 증가시키고 있다. 각부분품의 신뢰도와 예방정비가 고도화되었음에도 불구하고 대단히 많은 예측할 수 없고 산발적인 고장이 발생된다. 현대 전자장비에서의 그러한 복잡성은 장비를 적절히 유지하는데 심각한 문제로 대두되며 가장 어려운 문제의 하나는 현재까지 완전히 기술자의 손에만 의존되었던 고장개소를 파악하는 문제이다.

이 지면에서는 결함식별(Fault Identification) 문제를 연구했는데 가장 적은 외부 Test points

* 正會員 韓國艦隊司令部 通信參謀室
(Office of Comm. Staff ROKN. Fleet)

만 사용해서 식별할수 있게 했고 수동 회로망 및 능동 회로망에서 일어나는 결함을 자동적으로 식별할 수 있는 절차를 제시하였다. 이러한 궁극의 목적을 달성하기 위해서 회로요소변화(Network Element Deviation)에 따른 회로망 함수의 감도 문제를 연구하여 매트릭스 연산을 요하는 한방법을 소개했다.

이 방법에서는 회로망 감도에 따라 한조의 시험 주파수를 선택했고 이것을 기준으로 결함식별 영역을 정의하고 결함 식별 매트릭스를 조성했다. 다음에 한개의 벡터를 결함식별 매트릭스에 곱하여줌으로써 다른 한개의 벡터를 얻는데 이 벡터가 결함을 식별해주는 역할을 하는 것이다.

단식요소 결함 식별방법(The Single Element Fault Identification Method)이 연구되고 이 방법을 이용하여 복식요소 결함식별 방법(The Combined Element Fault Identification Method)을 도입시켰다. 이러한 방법을 자동적으로 수행하는 콤퓨터 프로그램설명은 지면 관계상 생략한다.

2. 제시된 방법

2.1. 목 적

이 지면에서 제시된 방법의 목적은 시스템전달함수의 크기만을 측정하므로써 결함식별문제를 수행할 수 있는지의 여부를 결정하기 위한 가능한 방법을 연구한 것이다. 이 방법에서 가장 적은수의 시험 주파수와 시험단자점 즉 정상적인 입력및 출력단자가 사용되어졌다.[2]

2.2. 기본 원리

아래와 같은 그림 1을 고찰하자.

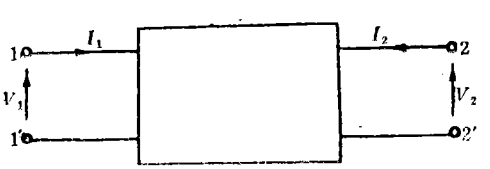


그림 1. 4단자회로망
Fig. 1. 2-Port network

개방 회로 임피이던스 함수는 전압을 전류의 함수로써 나타낼수 있으며 매트릭스 형태로써 표현한다면

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \tag{1}$$

이와같은 회로의 전달 함수는 외적으로 개방회로 임피이던스로써 특정지울 수 있다.

순방향 전압비 전달함수 T_{12}와 역방향 전압비 전달함수 T_{21}은 다음과 같이 나타내어진다.[6]

$$T_{12} \equiv \frac{V_2}{V_1}\Big|_{I2=0} = \frac{Z_{21}}{Z_{11}} \tag{2}$$

$$T_{21} \equiv \frac{V_1}{V_2}\Big|_{I1=0} = \frac{Z_{12}}{Z_{22}} \tag{3}$$

일반적으로 전달함수는 회로요소 E와 복소 주파수 S의 유리함수로써 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$T(S, E) = K \frac{\prod_{i=1}^{m}(S+Z_i)}{\prod_{j=1}^{n}(S+p_j)} \tag{4}$$

단 영점(零點), Z_i,와 극(極), p_j, 그리고 K는 E의 함수이고 m와 n는 각각 영점과 극의수이다.

식 (4)의 대수를 취하면 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$l_n T(\mathrm{S,E}) = l_n K + \sum_{i=1}^{m} l_n (S+Z_i) - \sum_{j=1}^{n} l_n (S+p_j) \tag{5}$$

그리고 식 (5)를 미분하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{d}{dE}[l_n T(\mathrm{S,E})] = \frac{1}{T(\mathrm{S,E})} \frac{d}{dE}[T(\mathrm{S,E})]$$

$$= \frac{1}{K}\frac{dK}{dE} + \frac{1}{S+Z_1}\frac{d}{dE}(S+Z_1) + \frac{1}{S+Z_2}\frac{d}{dE}(S+Z_2) + \cdots + \frac{1}{S+Z_m}\frac{d}{dE}(S+Z_m) - \frac{1}{S+p_1}\frac{d}{dE}(S+p_1) - \frac{1}{S+p_2}\frac{1}{dE}(S+p_2) - \cdots - \frac{1}{S+p_n}\frac{d}{dE}(S+p_n)$$

$$\therefore\ d(l_n T(S,E))=\frac{d(T(S,E))}{T(S,E)}$$

$$=\left\{\frac{1}{K}\frac{dK}{dE}+\sum_{i=1}^{m}\frac{1}{S+Z_i}\frac{dZ_i}{dE}\right.$$

$$\left.-\sum_{j=1}^{n}\frac{1}{S+p_j}\frac{dp_j}{dE}\right\}dE \qquad (6)$$

전달 함수 Sensitivity는 식 (6)으로 표시된다. 이 전달 함수 Sensitivity는 극및 영점 Sensitivity와 아주 가까운 관계가 있으며 $\frac{Dp_j}{DE}$와 $\frac{DZ_i}{DE}$는 각각 극점및 영점 Sensitivity로 정의되었다. 다시 말하면 $T(S,E)$의 변화는 $T(S,E)$의 한개의 극과 혹은 한개의 영점의 위치의 변화된 형태로써 나타내어 질수 있다.

식 (4) 및 (6)으로 부터 극—영점배치 형태중의 어떤 한 개의 변화는 전달 함수의 변화를 일으키는 원인이 됨을 알 수 있다. 극 및 영점이 회로 요소, E의 치에 관계 있고 또한 $T_{12}(S,E)$와 $T_{21}(S,E)$는 E의 함수임으로 내부의 구성요소의 변화가 여하히 외부의 전압비 전달함수의 변화와 관계있는가 하는 것을 연구해본다는 것은 어렵지않다. 즉 내부회로 요소가 어떻게 외부전압에 영향을 주는가를 연구한 것이다.

2.3. 예비 고찰

쉽게 설명하기 위해서 다음 그림 2와 같은 간단한 회로를 생각하자.

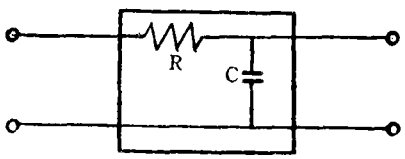


그림 2. 4단자 RC 회로망
Fig 2. 2-Port RC network

정상적인 R, C의 치를 편의상 각각 1 Ohm 및 1 Farad라 했는데 R 및 C의 치는 O부터 무한대까지 변화시킬 수 있다. C의 치가 변한다보고 그치를 4개 구역의 변화로 그림 3과 같이 나눌수 있다. 각각 첫째 변화(1st Deviatin) 둘째변화 셋째변화 및 넷째변화로 칭해보자.

그림 2의 순방향 전압비 전달함수는

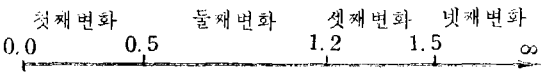


그림 3.
Fig 3.

$$T_{12}(S,\ E)=\frac{1}{1+RCs} \qquad (7)$$

로 표시된다.

그 크기는

$$\left|T_{12}\right|=\frac{1}{\sqrt{1+(C\omega)^2}} \qquad (8)$$

로 표시된다. 그러면 규격화 $|T_{12}|$는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{|T_{12}|\triangle E}{|T_{12}|}=\frac{\sqrt{1+\omega^2}}{\sqrt{1+(C\omega)^2}} \qquad (9)$$

단 $\triangle E$는 C가 변화한다함을 의미하는 것이다

식 (9)는 회로요소 C와 주파수 ω와의 함수이며 어떤 특성된 3개 주파수에 대한 4개 변화에 대해서 그림 4및 그림 5와 같이 나타낼 수 있다.

그림에서 $Xi(i=1.2.3)$는 선택된 주파수에 대한 회로 요소의 변화에 따른 규격화 $|T_{12}|$를 나타내는 것이다. 주파수를 종축으로 하고 규격화 $|T_{12}|$를 횡축으로한 좌표면 그림 5에서 더욱 확실히 알 수 있다. 이 좌표면에서 C의 4개 변화 구역에 따른 4개 영역을 잘 볼수 있다.

만약 영역—2를 허용될수 있는 정상영역(Normal Region)이라하면 영역—1, 3, 4는 비정상적인 영역이 된다. 바로 이 비정상 영역이 C의 변화허용 범위를 넘는 결함영역(Faulty Region)이 되는 것이다. 4개 영역을 구분하는 3개의 C의 한계치(限界値)에 대한 규격화 $|T_{12}|$의 치를 그림 4에서 표시한 영역의 특정주파수에 대한 한계치라 할 수 있고 이 한계치를 기준으로 측정한 규격화 $|T_{12}|$가 상영역(上領域)이냐 하영역(下領域)이냐에 따라 결함 식별매트릭스를 조성하는데 이곳에서는 지면관계상 설명을 보류한다.[3]

결과적인 결함식별 매트릭스는 다음과 같은 형태가 된다.

단 r은 구분할 영역의수와같고 n는 선택된 주

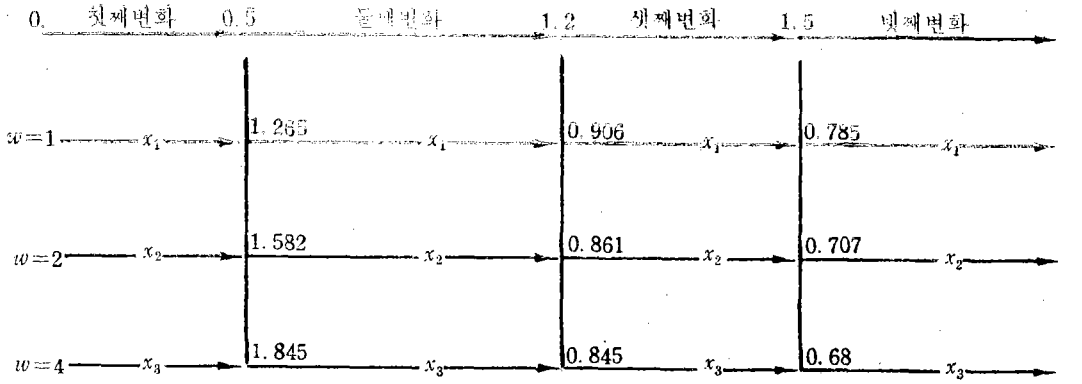


그림 4. 회로 요소 변화에 따른 규격화 $T|T_{12}|$
Fig 4. The normalized $|T_{12}|$ corresponding to the element deviation

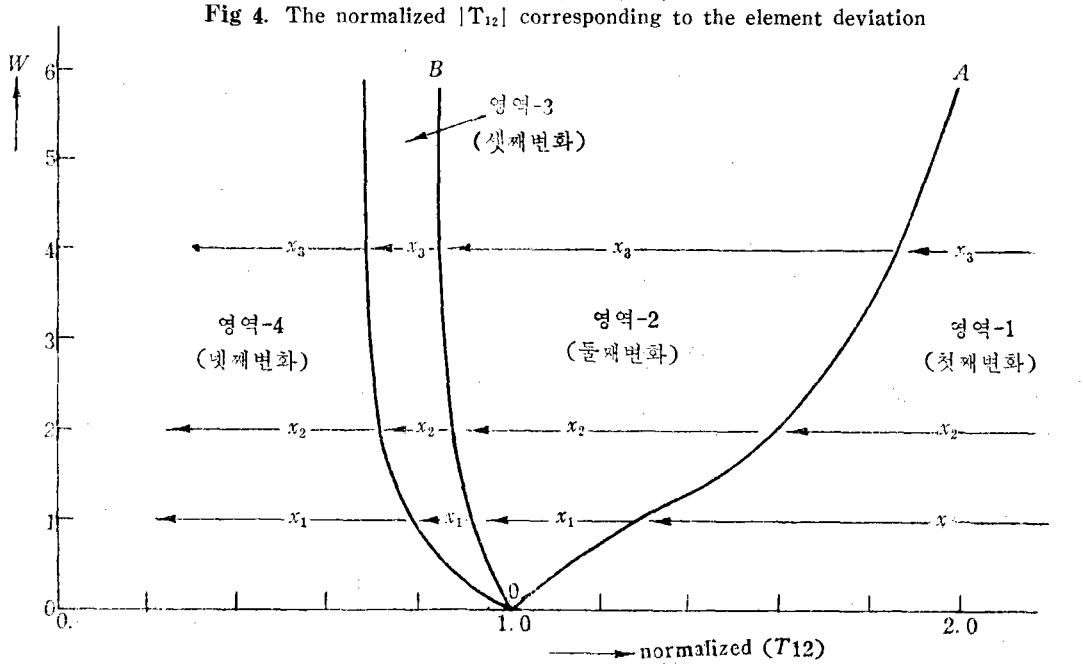
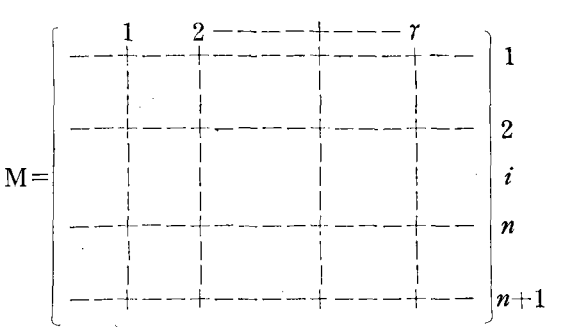


그림 5. 주파수 규격화 $|T_{12}|$ 좌표면
Fig 5. The frequency-normalized $|T_{12}|$ coordinate plane

파수의 수와 같다.

2.4. 제시된 방법의 적용



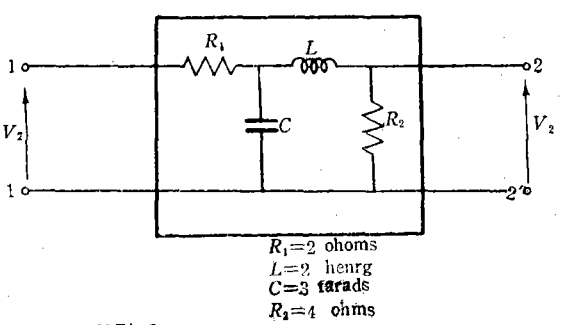


그림 6.
Fig 6.

그림 6에 나타낸 회로의 전달함수 T_{12}는

$$T_{12}=\frac{R_2}{R_1\,LCS^2+(R_1R_2C+L)S+R_1+R_2}$$

$$=\frac{1}{3S_2+0.5S+1.5}$$

$$=\frac{\frac{1}{3}}{(S+0.262)\,(S+1.90)} \qquad (10)$$

식 (10)의 크기의 특성을 半對數 좌표 그라프상에 그려서 본다면 다음과 같은 3개의 시험주파수를 선택하는것이 적절할것이라 고려 될것이다.

$\omega_1=2.00$ radian/sec

$\omega_2=1.02$ radian/sec

$\omega_3=0.02$ radian/sec

이 선택된 시험 주파수를 기준으로해서 결함영역을 결정하는데 이 영역은 회로 요소가 전달 함수에 미치는 영향을 고려하여 결정할 수 있다.

그림 6과 같은 회로에서는 결함 영역을 12개의 결함 식별 영역으로 구분했는데 이 12개의 영역이 어떤회로 요소가 어느 정도의 변화를 이르켰는가를 나타내어 준다. 회로요소의 변화정도는 결함식별 영역을 결정할때 이미 정의되는 것이다

3개의 시험 주파수와 결함식별 영역을 중심으로 결함 식별 매트릭스를 조성했는데 다음에 그 결과만 표시했다.

$$M=\begin{bmatrix} -4. & 4. & -4. & -4. & 2. & 4. & -4. & 4. & -2. & -4. & 2. & 4. \\ -4. & 4. & -2. & -4. & 2. & 2. & -4. & 4. & -2. & -2. & 2. & 2. \\ -4. & 4. & 2. & 2. & -2. & -2. & -2. & 2. & -4. & -4. & 4. & 4. \\ 11.98 & -11.98 & 4.54 & 6.14 & -1.06 & -3.46 & 10.14 & -9.86 & 8.78 & 10.38 & -7.18 & -9.58 \end{bmatrix}$$

물론 결함 영역을 결정한후 결함 식별 Matrix을 조성할때까지 몇개의 까다로운 단계를 거쳐야 하나 여기에서는 지면관계상 생략하였다.[3)]

다음은 이 결함 식별 Matrix를 어떻게 사용해서 외부 단자만을 이용하여 내부 회로의 고장 부분을 알아내는 가를 설명하겠다.

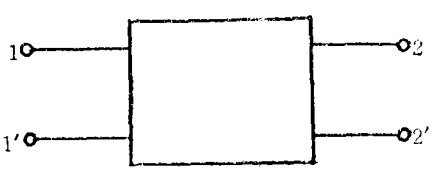


그림 7.
Fig 7.

그림 7에서 단자 1—1′에 선택된 시험 주파수의 단위 전압의 전압을 적용한후 단자 2—2′에서 전압을 측정한다는 것은 매우 간단한 일이다.

이러한 방법으로 몇개의 선택된 시험 주파수에서 측정한 출력전압을 성분으로한 벡터를 고려할 수 있을 것이다. 그림 6의 회로를 예로 든다면 이 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\overline{X'}=[X_1\ X_2\ X_3\ 1]$$

단 x_1, x_2, x_3는 각각 시험 주파수 ω_1 ω_2 및 ω_3에서 측정한 출력 전압이다. 이 벡터 $\overline{X'}$와 매트릭스 M를 다음과 같이 곱하면 한개의 다른 벡터 $\overline{Z'}$를 얻을 수 있다.

$$\overline{Z'}=\overline{X'}M$$

단 글자위에쓴 (′)부호는 Matrix의 Transpose를 의미한다. 예를 들어 x_1, x_2, x_3가 각각 1.3, 1.1, 0.95로 측정되었다면 벡터 $\overline{Z'}$는

$$\overline{Z'}=\overline{X'}M$$

$$=(1.3\ 1.1\ .95\ 1.)\ M$$

$$=(-1.42\ 1.42\ -.96\ -1.56\ 1.84\ 2.04$$
$$-1.36\ 1.64\ .18\ -.82\ 1.42\ 1.62)$$

$$=(Z_1\ Z_2\ Z_3\ Z_4\ Z_5\ Z_6\ Z_7\ Z_8\ Z_9\ Z_{10}\ Z_{11}\ Z_{12})$$

이 벡터 $\overline{Z}$가 모든 비밀을 간직하고 있다. 만약 시험중에 있는 회로망이 R영역에서 동작하고 있다면 벡터 $\overline{Z}$성분중의 R째 성분이 대수학적으로 가장 크다.

벡터 $\overline{Z}$성분중에서 대수학적으로 가장 큰 성분은 Z_6 즉 2.04이다. 회로가 6번째의 결함식별 영역에서 동작하고 있음을 나타낸다. 이것은 회로요소 L가 정상치인 2 헨리보다 37.5% 감소한 영역에서 작동하고 있음을 뜻한다. 이것은 이미 정의한 결함식별 영역에서 알 수 있기 때문이며 다만 회로가 어느 결함 식별영역에서 동작하고있는가를 알기만 하면 되는 것이다. 다시 말해서 인덕턴스 L가 고장임을 알 수 있다. 이렇게 해서 어떤 경우에서라도 그림 6 구성요소의 어느것이 어떠한 상태에 있는가를 다만 외부 시험 단자점을 이용해서 알수 있다는 것이다. 이러한 일련

의 데이타를 콤퓨터에 저장해 두었다가 필요한 수치 몇개만 집어 넣어주면 콤퓨터는 자동적으로 요구한 회로가 어떤 상태에 있는가를 나타낼 것이다.

앞에 설명한 시험절차를 구체적으로 열거하면 다음과 같은 순서가 된다.

STEP (1) PARTITION THE SYSTEM
STEP (2) GENERATE A SYMBOLIC SYSTEM FUNCTION
STEP (3) SELECT A SET OF TEST FREQUENCIES
STEP (4) SIMULATE A FAULT
STEP (5) DETERMINE THE FAULT IDENTIFICATION REGIONS
STEP (6) CONSTRUCT THE FAULT IDENTIFICATION MATRIX
STEP (7) GENERATE X
STEP (8) GENERATE Z
STEP (9) IDENTIFY THE FAULT
(A) SINGLE ELEMENT
(B) COMBINED ELEMENT

3. 실 험

3.1. 수동 회로망 실험

주파수 척도인자를 10000 크기 척도인자를 100으로하여 그림 6 회로에 적용하면 회로요소의 치와 선택한 3개의 시험 주파수는 다음과같이 된다.[6]

R_1=200 ohms f_1=3185Hz
L=20 mh f_2=1624Hz
C=3 μf f_3=31.8Hz
R_2=400 ohms

이와같은 실제적 회로에 결함식별 MATRIX를 적용한 결과 입력단자와 출력단자만을 이용, 내부고장을 자동적으로 식별할 수 있었다. 즉 그림 6은 다음의 그림 8과 같이 된다.

위의 그림 8에서 임의로 한개요소의 치 L를 정상치인 20mh보다 37.5% 감소한 12.5mh로 변화시켜 놓은후 주파수가 3185Hz인 단위볼트의 입력을 단자 1—1′에 가하고 그러면 단자2—2′에서 측정한 전압치가 x_1이 될것이고 주파수 f_2 및

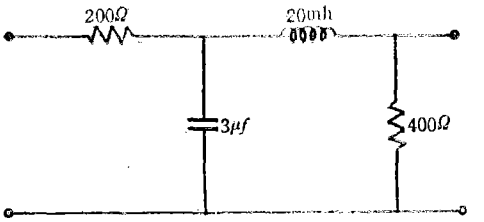


그림 8.
Fig. 8.

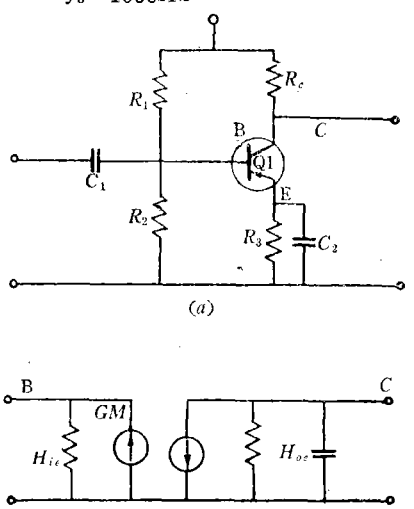
f_3에서 같은 방법으로 측정한 전압치가 x_2및 x_3가 될 것이다.

이 실험결과 x_1, x_2, x_3는 각각 1.31 1.09 0.95가 되여 전에 설명한 이론과 일치된다.

3.2. 능동 회로망 실험

그림 9와 같은 회로를 능동회로망 실험에 사용하였다.[4)5)] 이 회로의 주파수반응곡선을 ECAP를 이용하여 반대수좌표면에 그려 다음과같은 시험 주파수을 택했다.

f_1=10Hz
f_2=100Hz
f_3=1000Hz



R_1=100K ohms
R_2 =10K ohms
R_3 = 1K ohms
R_c = 5K ohms
C_1 = 5 uf
C_2 = 50 uf
$Q1$…2N1414
H_{ie}=1300 ohms
$1/H_{oe}$=36 K ohms
H_{re}=2.9 10^{-4}
H_{fe} = 42
C_{oe} =26 pf
GM=H_{fe}/H_{ie}

(b) small signal ECAP equivalent circuit for Q1

그림 9.
Fig. 9.

필요한 데이타는 실제회로를 이용하여 얻었고 R_2, R_3, R_c, C_2에 제시된 방법을 적용하였다.

정상영역을 결정후 비정상영역을 14개의 결함식별영역으로 나눈다음 콤퓨터를 이용하여 결함식별 MATRIX를 조성했는데 다음과 같다.

−3.00	−5.00	3.00	5.00	7.00	−1.00	−5.00	7.00	5.00	7.00
−4.00	−4.00	4.00	4.00	4.00	−2.00	−4.00	6.00	4.00	6.00
−4.00	−4.00	6.00	6.00	6.00	−2.00	−2.00	6.00	0.0	0.0
14.03	15.63	−8.73	−10.83	−13.23	9.27	14.31	−15.63	−4.43	−9.23
7.00	−1.00	−3.00	−5.00						
6.00	0.0	−2.00	−4.00						
−2.00	4.00	4.00	4.00						
−7.55	1.73	5.43	8.63						

참고로 14개의 결함식별영역을 다음에 표시한다.

영역	회로요소	퍼센테이지 변화
1	R_2	−40% 이하
2	R_2	−60% 이하
3	R_2	+30% 이상
4	R_3	−25% 이하
5	R_3	−55% 이하
6	R_3	+25% 이상
7	R_c	−20% 이하
8	R_c	+20% 이상
9	C_2	−20% 이하
10	C_2	−30% 이하
11	C_2	−70% 이하
12	C_2	+25% 이상
13	C_2	+40% 이상
14	C_2	+70% 이상

벡타 $\overline{Z}$ 조성과 결함식별에 대한 두가지 예를 다음에 설명한다.

경우 1. 저항 R_2를 정상치 $10K\Omega$부터 $14K\Omega$으로 변화시켰다. 그러니 측정된 T_{12}의 크기는 각각 시험 주파수 f_1, f_2 및 f_3에서 11.71, 91.0 그리고 179.0이었다.

정규화된 T_{12}의 크기는

$x_1=1.03$

$x_2=1.08$

$x_3=1.26$

경우 2. 만약 R_c를 $7K\Omega$으로 변화시켰다면 측정된 T_{12}의 크기는 3개의 시험 주파수에서 각각 15.9 126.0 및 190.2이였었다. 정규화된 T_{12}의 크기는

$x_1=1.39$

$x_2=1.5$

$x_3=1.34$

결함식별 MATRIX M를 이용하여 콤퓨터에서 나타낸 결함식별영역에서 다음사항을 알 수 있었다.

경우 1. 벡타 $\overline{Z}$ 성분중 Z_3가 대수학적으로 가장 큰 성분이다. 즉 회로가 결함식별영역 3에서 동작하고 있음을 나타낸다. 저항 R_2는 정상치 보다 30퍼어센트 이상 증가하였음을 나타내는 것이다.

경우 2. 결함식별 영역 8에서 동작하고 있음을 나타내며 R_c가 20퍼어센트 이상 변화하였음을 의미한다. 따라서 실제회로요소의 변화상황과 결함식별 MATRIX를 이용한 콤퓨터의 결과와 일치함을 알 수 있다.

복식 요소 결함식별 방법은 단식요소 결함식별 방법을 적절히 연결시킨 것인데 자세한 것은 생략한다.

4. 결 론

결함식별 방법에 대해서는 미국에서 여러 사람들이 연구 발전시키고있으며 근본적인 면에서 재래식 고장식별 방법을 적용할려면 실제 적용하는 사람 자신이 많은 공학적 지식을 갖추어야 하나 이 지면에서 제시된 방법은 결함식별 MATRIX만 적절히 조성하여 콤퓨터에 저장해두면 다만 출력단자에서 측정한 치만 얻으면 되기 때문에 특별한 공학적 지식을 필요로하지 않는것이 특징으로 되어있다. 따라서 아무 사람이라도 적절한 작업의 진행순서만 알면 되기에 콤퓨터시설이 많은 현대에 있어서는 그 발전이 유익하지 않을까 고려된다.

지면관계상 결함식별 MATRIX 형성과정을 설명 못했다.

참 고 문 헌

1. Courville, J. D., *A Topological Approach to Fault Isolation.* MSEE. Thesis, Naval Postgra-

duate School, Monterey, California, 1969.

2. Chan, S. P., *Fault Diagnosis of Linear Systems.* Proceedings Seventh Annual Allerton Conference on Circuit and System Theory, pp. 503-510, Oct. 1969.
3. Finkel, S. I., Nilsen, R. N., and Clair, E. St., "A Mathematical Technique for Automatic Fault Isolation in a Complex System," *Vitro Labs*, W. Orange, N. J., Contract No. AF 33(657)-9184, May 1963.
4. Meenpaa, J. H., Stehman, C. J., and Stahl, W. J., "Fault Isolation in Conventional Linear System: A Progress Report," *IEEE Transactions on Reliability*, V. R-18, No. 1, pp. 12-14, February 1969.
5. Seshu, S., and Waxman, R., "Fault Isolation in Conventional Linear System-A Feasibility Study," *IEEE Trans. on Reliability*, V. R-15, No-1, pp. 11-16.
6. Valkenberg, V., *Introduction to Modern Network Synthesis.* pp. 36-50, 209-234, Wiley, 1960.